بررسی حد شکل‌دهی و جابه‌جایی خط جوش، در شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی با استفاده از روش‌های عددی و تجربی*

رسول صفدریان کرویه[۱]   حسن مسلمی نائینی[۲]   محمد نوقابی[۳]   عماد رحیمی[٤]

چکیده نمودار حد شکل‌دهی، یک روش مفید برای شناسایی شکل پذیری ورق‌های فلزی می‌باشد. در این تحقیق، مدل‌های عددی متفاوتی برای بررسی حد شکل‌دهی (FLD) لوح‌های ترکیبی استفاده می‌شود. لوح‌های ترکیبی متشکل از ورق‌های پایه از جنس IF و با ضخامت متفاوت بودند که با استفاده از جوش لیزر CO_2 به هم جوش شدند. منحنی حد شکل‌دهی استخراج شده با استفاده از مدل‌های عددی، با منحنی حد شکل‌دهی حاصل از آزمایش‌های تجربی و مدل تجربی مؤسسه تحقیقاتی کشش عمیق آمریکای شمالی مقایسه می‌شود. هدف اصلی این تحقیق بررسی میزان کارایی روش‌های عددی در پیش‌بینی حد شکل‌دهی و جابه‌جایی خط جوش می‌باشد. این مدل‌های عددی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی شامل: مشتق دوم نازک شدگی (SDT)، نرخ کرنش مؤثر (ESR)، نرخ کرنش بیشینه (MSR)، نرخ کرنش ضخامت (TSR) و گرادیان ضخامت (TG) می‌باشند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که گلویی شدن، زمانی اتفاق می‌افتد که مقادیر مدل‌های ESR، MSR، TSR بیشینه باشند و برای معیار گرادیان ضخامت، زمانی گلویی شدن اتفاق می‌افتد که $TG \leq ۰/۷۸$ باشد. بر اساس معیار مشتق دوم نازک شدگی، گلویی شدن زمانی است که اولین پیک در نمودار SDT نسبت به زمان اتفاق می‌افتد. جابه‌جایی خط جوش یکی از پارامترهایی است که شکل‌دهی این ورق‌ها را تحت تأثیر می‌گذارد. بیشترین مقدار جابه‌جایی خط جوش با استفاده از معیارهای عددی پیش‌بینی و با نتایج تجربی مقایسه می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که معیار SDT از دقت مناسبی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی و جابه‌جایی خط جوش در شکل‌دهی لوح های ترکیبی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی لوح ترکیبی (TWB)، منحنی حد شکل‌دهی (FLD)، جابه‌جایی خط جوش

Investigation of Forming Limit and Weld Line Movement in the Forming of Tailor Welded Blanks using Experiment and Numerical Methods

R. Safdarian Korouyeh   H. Moslemi Naeini   M. Noghabi   E. Rahimi

Abstract *The forming limit diagram (FLD) is a useful method for characterizing the formability of sheet metals. In this paper, different numerical models were used to investigate the FLD of Tailor Welded Blank (TWB). TWBs were Co2 laser-welded samples of interstitial-free (IF) steel sheets with different thicknesses. The results of the numerical models were compared with the experimental FLD as well as with the empirical model proposed by the North American Deep Drawing Research Group (NADDRG). The emphasis of this investigation is to determine the performance of these different approaches in predicting the FLD. These numerical models for FLD are: second derivation of thinning (SDT), effective strain rate (ESR), major strain rate (MSR), thickness strain rate (TSR) and thickness gradient (TG). Results of this research show necking will happen, when the value of MSR, TSR, ESR criteria is maximum, TG ≤ 0.78 and SDT criterion has the first peak in forming process time. Weld line movement is one of parameters which influence formability of TWBs. Maximum of weld line movement of TWB base on different numerical criteria was predicted and compared with experimental results. Results of this research show that SDT criterion has a good accuracy for prediction of forming limit diagram and also weld line movement in the forming of TWB.*

Key Words Tailor Welded Blank (TWB), Forming Limit Diagram (FLD), Weld Line Movement

---

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۹/۲۱، اولین پذیرش آن در تاریخ ۹۱/۳/۳ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۹۱/٤/۲٦ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکتری، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: استاد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(۳) دانشجوی دکتری، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر

(٤) کارشناس ارشد، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

یک لوح ترکیبی متشکل از دو یا چند ورق با ضخامت یا استحکام متفاوت می‌باشد که به هم جوش شده‌اند. طراحان خودرو دنبال روش‌هایی جدید برای کاهش وزن خودرو و کاهش هزینه ساخت هستند تا از این طریق میزان مصرف سوخت را کاهش دهند و در دنیای رقابتی خودرو باقی بمانند. یک راه برای دستیابی به این نیاز ظاهراً متناقض، استفاده از لوح‌های ترکیبی در بدنه خودرو می‌باشد [1].

تخمین شکل پذیری ورق، یک نقش اساسی در طراحی فرآیندهای شکل‌دهی ورق دارد. شکل پذیری ورق‌های فلزی، به وسیله پدیده گلویی شدن محدود می‌شود. شکل پذیری ورق‌ها، اولین بار با استفاده از روش تجربی کلر و بکوفن [2] و پس از آن به وسیله گودوین [3] برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی بررسی شد و پس از آن در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفت. سه روش برای تعیین FLD وجود دارد: روش تحلیلی، روش تجربی و روش عددی. حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی عموماً به‌صورت کرنش‌های اصلی حد شکل‌دهی تحت شرایط مختلف بارگذاری قبل از شروع گلویی شدن بیان می‌شود و نمودار حد شکل‌دهی نامیده می‌شود. روش تجربی تعیین حد شکل‌دهی، مستلزم این است که ورق‌های فلزی در مسیرهای کرنش مختلف قرار گیرند. برای این کار ورق‌هایی با پهنای متفاوت اما طول یکسان تحت آزمون FLD که یک آزمون تغییر شکل خارج از صفحه (Out of Plane) با یک سنبه کروی است، قرار می‌گیرند [4]. از آن جایی‌که تعیین FLD با استفاده از روش تجربی مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است، تحقیقات زیادی برای پیش‌بینی FLD با روش‌های تئوری انجام شد. پیش‌بینی FLD با استفاده از روش‌های تئوری اولین بار توسط سویفت [5] و هیل [6] تحت شرایط تنش صفحه ای ارایه شد. بعد از آن مارسینیاک و کوچینسکی [7] یک معیار بر اساس وجود یک ناهمگنی در ورق ارایه کردند که این ناهمگنی با فاکتور f (نسبت ضخامت قسمت نازک به ضخیم) معرفی شد. آنها یک روش عددی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی ورق گسترش دادند.

به موازات روش‌های وقت گیر تجربی یک روش عددی بر اساس شبیه سازی در کامپیوتر گسترش پیدا کرد. در سال ۱۹۹۱ ناراشیما و واگونر [8] تأثیر یک شیار را روی حد شکل‌دهی در شرایط کشش صفحه‌ای با استفاده از روش اجزای محدود بررسی کردند و نتایج آن را با مدل مارسینیاک-کوچینسکی مقایسه کردند. این تحقیق نشان داد که در حین شبیه سازی کشش دو محوری ورق، گرادیان کرنش‌ها در نمونه‌ها افزایش می‌یابد تا این که ناگهان کرنش‌های بزرگی در محدوده‌ای که گلویی شدن اتفاق می‌افتد ایجاد شود. ناراشیما و واگونر [8] سه معیار متفاوت ارایه کردند:

۱- معیاری بر اساس تغییرات نرخ کرنش بیشینه (R_1)

۲- معیاری بر اساس تغییرات نرخ کرنش کمینه (R_2)

۳- معیاری بر اساس تغییرات نرخ کرنش مؤثر (R_3)

بین منطقه گلویی شده و منطقه سالم: نتایج آنها نشان داد وقتی $R_1 \geq 4, R_2 \geq 10$, و $R_3 \geq 4$ باشد، گلویی شدن اتفاق خواهد افتاد. برون [9] پیشنهاد کرد که ماده در زمانی‌که نازک شدگی شتاب می‌گیرد شروع به گلویی شدن می‌کند. این پدیده توسط نویسندگان متفاوتی که با استفاده از روش عددی و اجزای محدود FLD را تعیین کردند، دنبال شد [10]. کاربرد این روش‌های عددی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی در ادامه ارایه می‌شود.

بیشتر تحقیقات انجام شده روی لوح‌های ترکیبی در زمینه شکل پذیری و کاربردهای آنها می‌باشد. FLD ورق نازک‌تر یا ضعیف‌تر ممکن است معیار مناسبی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی لوح ترکیبی نباشد. شای و همکاران [11,12] شرایط بهینه و مناسب برای به دست آوردن جوش مناسبی که شکل پذیری لوح‌های

ترکیبی را افزایش دهد را بررسی کردند. آنها بر اساس آزمایش‌های تجربی پیشنهاد کردند که نسبت حد ضخامت و نسبت حد استحکام، نباید بیشتر از حد کرنش ورق نازک‌تر باشند. چین و همکاران [13,14] برای پیش‌بینی شروع گلویی شدن لوح ترکیبی AA5754 از معیار دو شاخه‌ای شدن استفاده کردند. در تحلیل آنها از یک مدل FEM همراه با یک مدل تئوری برای پیش‌بینی شکست استفاده شد. چان و همکاران [15] فهمیدند که هر چه نسبت ضخامت بیشتر باشد، منحنی حد شکل‌دهی در سطح پایین‌تری قرار دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد که حداقل کرنش بیشینه با افزایش نسبت ضخامت کاهش می‌یابد.

در تحقیق حاضر از روش‌های عددی متفاوتی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی لوح ترکیبی استفاده شد. این روش‌های عددی شامل: نرخ کرنش مؤثر (ESR)، نرخ کرنش بیشینه (MSR)، نرخ کرنش ضخامت (TSR)، گرادیان ضخامت (TG) و مشتق دوم نازک شدگی (SDT) برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی می‌باشد. از معیار تسلیم هیل ۴۸ و مدل سخت شوندگی برای مدل کردن رفتار ماده، استفاده شد. نتایج این مدل‌های عددی با نتایج تجربی و همچنین مدل نیمه تجربی ارایه شده توسط مؤسسه تحقیقاتی کشش عمیق آمریکای شمالی (NADDRG) مقایسه شد. لوح‌های ترکیبی با استفاده از جوش CO_2 ورق‌هایی با ضخامت‌های متفاوت (۰/۷۷و ۱/۱۷ میلی‌متر) تولید شدند. FLD تجربی با استفاده از تست استاندارد هکر تعیین شد. این آزمایش‌های تجربی با استفاده از FEM شبیه سازی شدند و با استفاده از روش‌های نرخ کرنش معیارهایی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی ارایه شد. ارتفاع کشش در زمان شکست و همچنین موقعیت شکست در نمونه‌های تجربی و نیز شبیه‌سازی‌ها با هم مقایسه شدند.

روش انجام تحقیق

مواد مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی و خواص آنها. موادی که در آزمایش‌های تجربی استفاده شدند ورق‌های فولادی کم کربن بدون عناصر بین نشینی (Interstitial-Free) (IF) می‌باشد. این نوع ورق‌ها به دلیل خاصیت فرم پذیری بالایی که دارند برای ساخت بدنه خودرو استفاده می‌شوند. ترکیب شیمیایی فولاد IF استفاده شده در این تحقیق در جدول (۱) آمده است.

خواص مکانیکی و پارامترهای شکل‌دهی این فولاد در جدول (۲) نشان داده شده است. پارامترهایی مانند تنش تسلیم، تنش نهایی، توان و ضریب کارسختی با استفاده از تست استاندارد ASTM-E8 با سرعت mm/min ۲ تعیین می‌شود [16].

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد IF

عنصر	C	Si	P	S	Mn	Ni	Cr	Cu	Ti	Al
مقدار (٪)	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳٤	۰/۰۳

جدول ۲ خواص مکانیکی ورق IF

ضخامت ورق (mm)	YS (N/mm^2)	UTS (N/mm^2)	افزایش طول (%)	n	K (N/mm^2)	پارامتر ناهمسانگردی		
						r0	r45	r90
۰/۷۷	۱۵٦	۳۰۲	٤۷	۰/۲۵	٥٤۲/٤	۱/۹٤	۱/۸	۲/۷۳
۱/۱۷	۲۲۵	۳٤۰	٤۰	۰/۲۱	٦۱٦	۱/۸۱	۱/٦٤	۲/٥٤

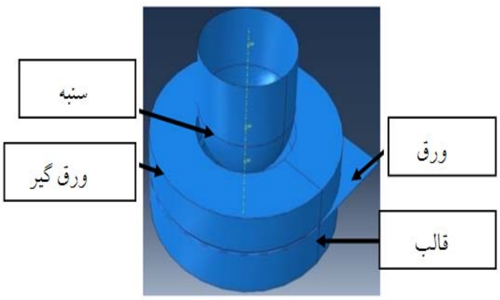
نسبت کرنش پلاستیک (r) که ناهمسانگردی ماده در سه راستای r_0، r_{45} و r_{90} را نشان می‌دهد با استفاده از آزمون استاندارد ASTM-E517 استخراج شد. برای تعیین r، نمونه‌ها تا ۲۰٪ کرنش طولی کشیده شدند (قبل از این که به نیروی ماکزیمم برسند). طول و عرض نهایی گیج اندازه گیری شد و با استفاده از رابطه زیر ناهمسانگردی محاسبه شد.

$$r=\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}=\frac{\varepsilon_w}{-(\varepsilon_w+\varepsilon_l)}=\frac{\ln(w_f/w_0)}{\ln(l_0 w_0/l_f w_f)} \qquad (1)$$

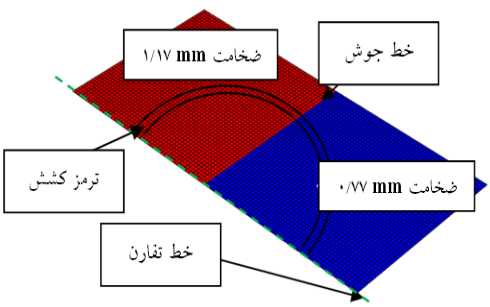
که w_0 و l_0 به ترتیب عرض و طول اولیه هستند و w_f و l_f عرض و طول نهایی، ε_w کرنش حقیقی در راستای عرض، ε_t کرنش حقیقی ضخامت و ε_l کرنش حقیقی طول می‌باشد.

ساخت لوح‌های ترکیبی. کیفیت جوش در لوح‌های ترکیبی بسیار حساس است و تأثیر زیادی بر روی شکل‌دهی آنها دارد. فرایندهای جوشکاری زیادی وجود دارد که می‌توان در جوش لوح‌های ترکیبی از آنها استفاده کرد؛ اما جوشکاری لیزر و جوشکاری اصطکاکی دو نوع جوشی هستند که بیشتر از سایر روش‌ها، برای جوش این ورق‌ها استفاده می‌شود. در این تحقیق لوح‌های ترکیبی IF با استفاده از جوش لیزر CO_2 به‌هم متصل شدند. پارامترهای جوش به گونه‌ای انتخاب شدند که جوش از کیفیت خوبی برخوردار باشد.

بررسی عددی حد شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی با استفاده از FEM. بررسی عددی فرآیند کشایی (Stretch Forming) لوح ترکیبی با استفاده از کد المان محدود Abaqus/Explicit 6.10 انجام شد. مدل FEM متشکل از یک سنبه سر کروی، ورق گیر، قالب دارای ترمز کشش و ورق می‌باشد (شکل ۱). این مدل بر اساس آزمون استاندارد هکر برای تعیین حد شکل‌دهی ورق ساخته شد [17]. از آن جایی‌که تغییر شکل سنبه، قالب و ورق گیر در حین فرایند ناچیز است به‌صورت صلب مدل شدند و به‌دلیل آن که به‌عنوان جسم صلب تحلیلی در نظر گرفته شدند نیازی به مش‌بندی آنها در نرم افزار نیست. ورق به صورت یک جسم تغییر شکل پذیر با استفاده از المان پوسته دارای چهار نقطه انتگرال‌گیری (S4R) و با ضخامتی برابر ضخامت ورق مدل شد. به دلیل تقارن، تنها نصف ورق، مدل‌سازی شد. از یک مش‌بندی مناسب برای ورق استفاده شد به‌گونه‌ای که جواب‌های شبیه‌سازی به نوع مش‌بندی وابسته نباشد. بدین معنی که اندازه المان‌های ورق تا اندازه‌ای کوچک شد که دیگر نتایج شبیه‌سازی تغییر نکند. طول و عرض هر المان ورق ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نمونه ورق مش‌بندی شده همراه با قید تقارن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱　مدل‌سازی در نرم افزار ABAQUS



شکل ۲　مش‌بندی ورق در نرم افزار ABAQUS

از خواص جوش در شبیه‌سازی‌ها صرف‌نظر شد. ضریب اصطکاک بین اجزای قالب و ورق برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. قالب، ثابت در نظر گرفته شد و سنبه با سرعت‌ mm/s ۱۰۰۰ به سمت پایین حرکت کرد [18]. انتخاب این سرعت با در نظر گرفتن شرط شبه استاتیک (Quasi-Static) بودن فرآیند می‌باشد که در بخش نتایج شرایط شبه استاتیک بودن فرآیند، بررسی می‌شود.

برای مدل‌سازی خواص ورق فلزی در شبیه سازی FEM از معیار تسلیم هیل ٤٨ استفاده شد [19].

$$f(\sigma)=\sqrt{\begin{matrix}F(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+G(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2+H(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2\\+2L\sigma_{23}^2+2M\sigma_{31}^2+2N\sigma_{12}^2\end{matrix}} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned}&F=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_{22}^2}+\frac{1}{R_{33}^2}-\frac{1}{R_{11}^2}\right),\ G=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_{33}^2}+\frac{1}{R_{11}^2}-\frac{1}{R_{22}^2}\right),\\&H=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_{11}^2}+\frac{1}{R_{22}^2}-\frac{1}{R_{33}^2}\right),\ L=\frac{3}{2R_{23}^2},\\&M=\frac{3}{2R_{31}^2},\ N=\frac{3}{2R_{12}^2}\end{aligned} \quad (۳)$$

F، G، H، L، M و N ثابت‌های معیار تسلیم هیل هستند. این ثابت‌ها را می‌توان در نرم افزار با ٦ پارامتر نسبت تنش تسلیم R_{11}، R_{22}، R_{33}، R_{12}، R_{13} و R_{23} با استفاده از معادلات (٤) وارد کرد.

$$\begin{aligned}&R_{11}=R_{13}=R_{23}=1,\ R_{22}=\sqrt{\frac{r_{90}(r_0+1)}{r_0(r_{90}+1)}}\\&R_{33}=\sqrt{\frac{r_{90}(r_0+1)}{r_{90}+r_0}},\ R_{12}=\sqrt{\frac{3r_{90}(r_0+1)}{(2r_{45}+1)(r_{90}+r_0)}}\end{aligned} \quad (٤)$$

که r_0، r_{45} و r_{90} ناهمسان‌گردی در صفحه ورق در راستای متفاوت نسبت به راستای نورد می‌باشد.

روابط تنش – کرنش در منطقه پلاستیک با استفاده از قانون کار سختی توانی هولومون مدل شد.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (٥)$$

که σ تنش جریان، ε کرنش حقیقی، K ضریب کارسختی و n توان کارسختی می‌باشد.

۸ نمونه استاندارد با پهنای متفاوت ولی طول‌های یکسان ۲۰۰ میلیمتر (۲۵×۲۰۰mm تا ۲۰۰×۲۰۰mm) برای در نظر گرفتن مسیرهای کرنش مختلف در منحنی حد شکل‌دهی شبیه سازی شدند. کرنش‌های حد شکل‌دهی با استفاده از تعدادی معیار عددی از نتایج شبیه‌سازی‌ها استخراج شد که در ادامه توضیح داده می‌شود. نیروی ورق‌گیر برای پهناهای متفاوت فرق می‌کرد ولی بین ۲۰ تا KN ٦۰ درنظر گرفته شد به‌گونه‌ای که نه در لبه ورق چین خوردگی ایجاد شود و نه سبب پارگی در موقعیت ترمز کشش شود. این نیروی ورق‌گیر به‌صورت یک نیروی متمرکز روی موقعیت ترمز کشش مشابه آن چه در شکل (۲) نشان داده شده است، اعمال شد. ترمز کشش دارای یک هندسه دایره‌ای به شعاع ٦٦ میلی‌متر و پهنای ۲ میلی‌متر می‌باشد.

معیارهای عددی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی لوح ترکیبی

در تحقیق حاضر شش معیار متفاوت برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی مورد استفاده قرار گرفت که در ادامه معرفی می‌شوند:

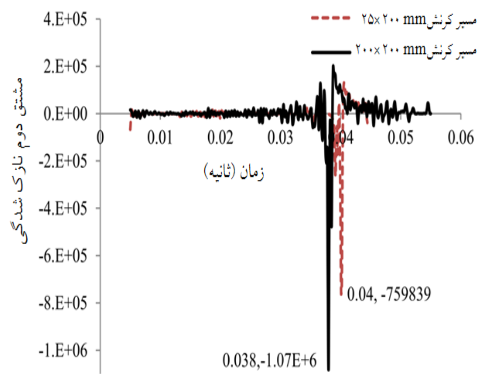
معیار مشتق دوم نازک شدگی (Second Derivative Of Thinning). همان‌طور که قبلاً اشاره شد نازک شدگی ماده می‌تواند معیاری برای گلویی شدن باشد. با استفاده از نظریه برون می‌توان زمان و موقعیت گلویی شدن یک نمونه را بر اساس مشتق دوم نازک شدگی به دست آورد [9,10]. بر اساس این مدل، ضخامت تمام المان‌های ورق در FEM بررسی شد و المان‌هایی که دارای حداقل ضخامت بودند مشخص شدند. نازک

شدگی (کرنش ضخامت) تمام المان‌هایی که دارای کمترین ضخامت بودند ذخیره شد. کرنش ضخامت در خروجی نرم افزار (Field Output) موجود است و به راحتی برای هر المانی از ابتدای فرآیند تا انتها قابل ذخیره سازی است. سپس مشتق دوم کرنش ضخامت این المان‌ها نسبت به زمان محاسبه شد و با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. به دلیل تغییر سریع ضخامت ورق در ناحیه گلویی شدن، مشتق دوم ضخامت دارای یک پیک در این ناحیه می‌باشد. مشتق دوم نازک شدگی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\ddot{\varepsilon}_{33} = \frac{d^2\varepsilon_{33}}{dt^2} \qquad (٦)$$

که ε_{33} کرنش ضخامت المان می‌باشد. المانی که در آن پیک $\ddot{\varepsilon}$ در زمان کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد به عنوان المانی که در آن گلویی شدن شروع می‌شود در نظر گرفته شد و زمان این پیک به عنوان زمان گلویی شدن در نظر گرفته شد.

المان‌های انتخاب شده از هر نمونه بر اساس این روش به عنوان المانی که گلویی شدن از آن‌جا شروع می‌شود در نظر گرفته شد. کرنش‌های بیشینه و کمینه برای این المان‌ها از نتایج شبیه سازی در نرم افزار استخراج شد و به عنوان نقاط تشکیل دهنده FLD مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۳) مشتق دوم نازک شدگی را برای المان‌های بحرانی دو مسیر کرنش ۲۵×۲۰۰mm و ۲۰۰×۲۰۰mm نشان می‌دهد. حداقل مشتق دوم نازک شدگی برای نمونه با پهنای ۲۵ میلی‌متر در زمان ۰/۰٤s اتفاق می‌افتد و برای نمونه با پهنای ۲۰۰ میلی‌متر در s ۰/۰۳۸. این اختلاف زمان برای حداقل SDT سبب متفاوت بودن کرنش بیشینه و کمینه این دو مسیر کرنش می‌شود و این روند برای سایر مسیرهای کرنش نیز تکرار می‌شود. FLD بر اساس روش SDT با استفاده از کرنش‌های کمینه و بیشینه تمام مسیرهای کرنش شکل می‌گیرد. در ضمن منظور از این زمان‌ها، زمان در مرحله‌ای (step time) است که در آن سنبه با حرکت به سمت پایین در حال شکل‌دهی قطعه می‌باشد. همان‌طور که از شکل (۲) مشخص است زمان این مرحله ۰/۰۵۵s می‌باشد که برای هر یک از نمونه‌ها در این بازه زمانی مشق دوم نازک شدگی دچار نوسان شدیدی مانند دو نمونه نشان داده شده در شکل (۲) می‌شوند. زمان هر مرحله و هم‌چنین سرعت سنبه به‌گونه‌ای انتخاب شده است که فرآیند از حالت شبه استاتیک خارج نشود.



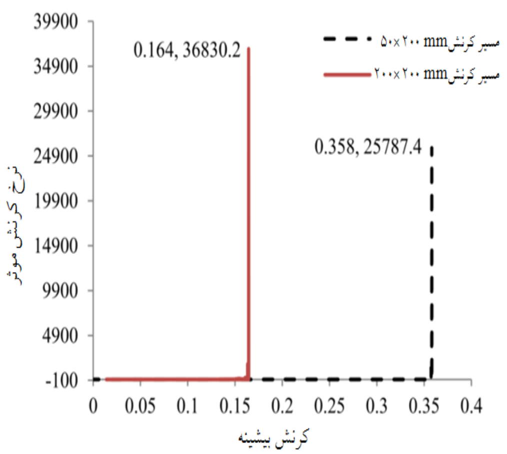
شکل ۳ مشتق دوم نازک شدگی برای المان‌های بحرانی دو مسیر کرنش ۲۵×۲۰۰mm و ۲۰۰×۲۰۰mm

معیار نرخ کرنش مؤثر (Effective Strain Rate). ESR برابر نسبت نرخ کرنش مؤثر المانی که در منطقه گلویی قرار دارد به نرخ کرنش مؤثر المانی که در منطقه سالم قرار دارد می‌باشد.

ESR=نرخ مؤثرکرنش منطقه گلویی/نرخ مؤثرکرنش منطقه سالم

همان‌طور که قبلاً اشاره شد محققین دیگر شرط گلویی شدن را ESR ≥4 می‌دانستند [8]، ولی نتایج این تحقیق برای لوح‌های ترکیبی نشان می‌دهد وقت یکه ESR ماکزیمم است گلویی شدن اتفاق خواهد افتاد. در این تحقیق، ابتدا المانی که دارای حداقل ضخامت

می‌باشد (المانی که گلویی شدن از آنجا اتفاق می‌افتد) تعیین می‌شود. المان کنار المانی که گلویی شده است به عنوان المان سالم در نظر گرفته شد و ESR با استفاده از تعریف بالا برای کل زمان فرآیند محاسبه شد. زمانی که ESR بیشینه است از روی نمودار آن تعیین می‌شود و سپس کرنش بیشینه و کمینه برای المان سالم در زمانی که ESR بیشینه است، استخراج می‌شود و به عنوان نقطه‌ای از منحنی FLD در نظر گرفته می‌شود. این روند برای تمام نمونه‌هایی که برای به دست آوردن FLD مورد تحلیل قرار گرفته بودند، انجام شد تا تمام نقاط منحنی FLD به دست آید. شکل (٤) تغییرات ESR نسبت به کرنش بیشینه را برای دو مسیر کرنش متفاوت ۵۰×۲۰۰mm و ۲۰۰×۲۰۰mm نشان می‌دهد.

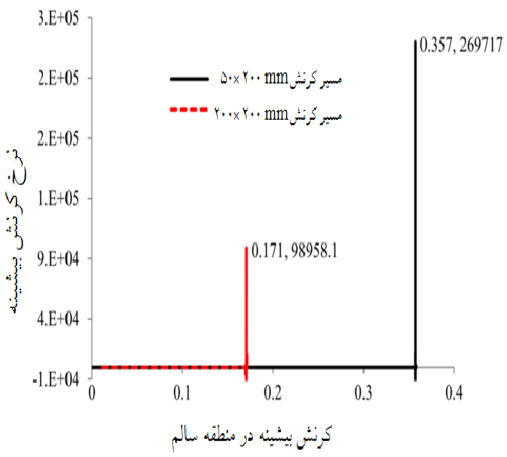


شکل ٤ تغییرات نرخ کرنش مؤثر نسبت به کرنش بیشینه برای دو مسیر کرنش ۵۰×۲۰۰mm و ۲۰۰×۲۰۰mm

معیار نرخ کرنش بیشینه (Major Strain Rate) MSR برابر نسبت نرخ کرنش اصلی بیشینه در منطقه گلویی به مقدار مشابه در منطقه سالم می‌باشد. MSR در منطقه گلویی یک باره افزایش پیدا می‌کند.

MSR= نرخ کرنش بیشینه اصلی منطقه گلویی/نرخ کرنش بیشینه اصلی منطقه سالم

تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که وقتی MSR≥10 گلویی شدن اتفاق می‌افتد [8]. نتایج این تحقیق برای لوح‌های ترکیبی نشان می‌دهد وقتی‌که MSR بیشینه است گلویی شدن اتفاق می‌افتد. MSR در تمام نمونه‌های FLD برای المان‌هایی که دارای حداقل ضخامت هستند با روشی مشابه ESR در کل زمان فرآیند محاسبه شد. کرنش‌های بیشینه و کمینه المان سالم در زمانی که MSR بیشینه بود به عنوان کرنش‌های حد شکل‌دهی در نظر گرفته شدند. تغییرات MSR با کرنش بیشینه در منطقه سالم برای دو مسیر کرنش ۵۰×۲۰۰mm و ۱۵۰×۲۰۰mm در شکل (۵) نشان داده شده است.



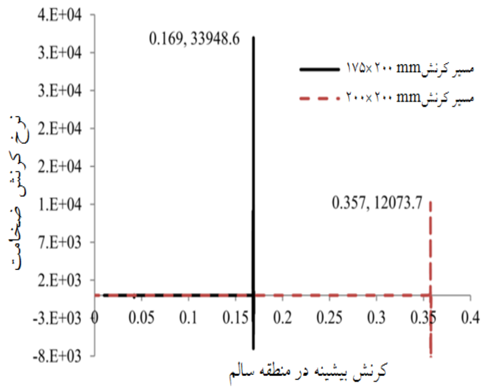
شکل ۵ تغییرات نرخ کرنش بیشینه نسبت به کرنش بیشینه برای دو مسیر کرنش ۵۰×۲۰۰mm و ۱۵۰×۲۰۰mm

معیار نرخ کرنش ضخامت (Thickness Strain Rate). TSR نسبت نرخ کرنش ضخامت منطقه گلویی به منطقه سالم، است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

TSR= نرخ کرنش ضخامت منطقه گلویی/نرخ کرنش ضخامت منطقه سالم

TSR و منحنی FLD مربوط به این معیار با روشی مشابه دو معیار قبل (ESR و MSR) محاسبه شدند.

وقتی که TSR بیشینه است گلویی شدن اتفاق می‌افتد. تغییرات TSR بر حسب کرنش بیشینه منطقه سالم برای دو مسیر کرنش ۵۰×۲۰۰mm و ۱۷۵×۲۰۰mm در شکل (٦) نشان داده شده است.

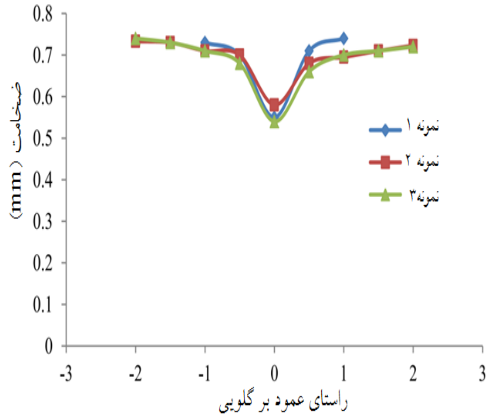


شکل ٦ تغییرات نرخ کرنش ضخامت نسبت به کرنش بیشینه برای دو مسیر کرنش ۵۰×۲۰۰mm و ۱۷۵×۲۰۰mm

معیار گرادیان ضخامت (Thickness Gradient). در معیار مارسینیاک – کوچینسکی (M-K) گلویی شدن زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت ضخامت منطقه گلویی به منطقه سالم به یک مقدار بحرانی برسد. یک معیار جدید توسط کومار و همکاران [20] بر اساس معیار M-K پیشنهاد شد. این معیار به صورت زیر بیان می‌شود:

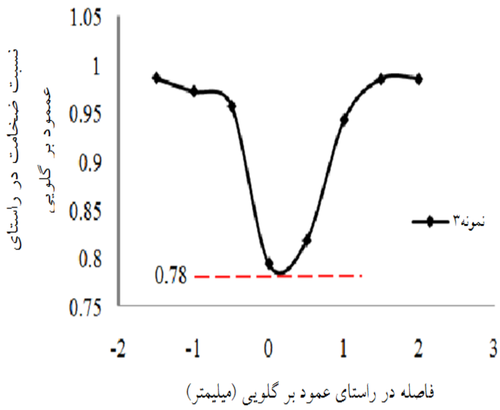
$$TG = \frac{\text{current thickness of notch}}{\text{current thickness of bulk}} \leq C$$

مقدار C با اندازه گیری تجربی تغییرات ضخامت در راستای عمود بر ناحیه گلویی در تعدادی نمونه کشش تعیین می‌شود. در تحقیق حاضر سه نمونه کشش عرضی از لوح ترکیبی IF با طول ۲۰۰ mm و عرض ۱۰mm آماده شد و مورد آزمایش کشش قرار گرفت. کشش تا زمانی‌که گلویی شدن شروع شود ادامه پیدا کرد. این زمان تقریباً قبل از وقتی است که تنش تسلیم نهایی اتفاق می‌افتد که از روی نمودار تنش– کرنش که در حین تست قابل مشاهده است، تشخیص داده می‌شود. تغییرات ضخامت برای این سه نمونه در راستای عمود بر راستای گلویی شدن با استفاده از میکرومتر اندازه گیری شد. شکل (۷) این تغییرات را برای سه نمونه نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت ضخامت در محل گلویی کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این روند برای هر سه نمونه مشابه است.



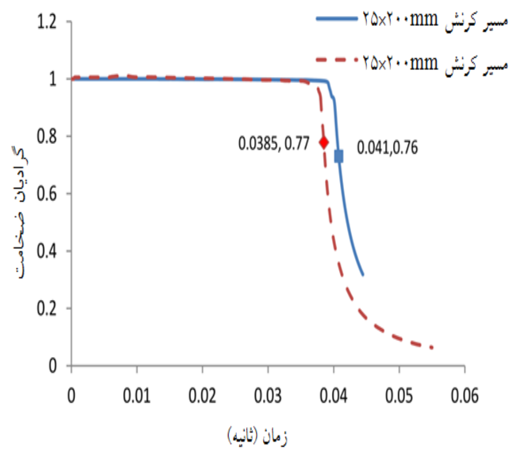
شکل ۷ تغییرات ضخامت در راستای عمود بر گلویی

همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است نسبت ضخامت (نسبت ضخامت یک المان به المان کناری) در راستای عمود بر گلویی به مقدار بحرانی ۰/۷۸ در نقطه شروع گلویی شدن می‌رسد.



شکل ۸ تغییرات نسبت ضخامت المان‌های مجاور در راستای عمود بر گلویی

مقدار C برای شبیه‌سازی‌ها برابر ۰/۷۸ در نظر گرفته شد. بنابراین در شبیه‌سازی‌ها، جفت المان‌هایی که نسبت ضخامت آنها زودتر به ۰/۷۸ رسید را به عنوان المان‌هایی که گلویی شدن از آنجا شروع می‌شود در نظر گرفته شد. وقتی $C\leq0.78$، کرنش بیشینه و کمینه المان ضخیم به عنوان نقطه‌ای از منحنی FLD در نظر گرفته شد. این روند برای تمام نمونه‌ها (مسیرهای کرنش) تکرار شد تا تمام نقاط منحنی FLD بر اساس این معیار به دست آید. شکل (۹) تغییرات TG را برای مسیرهای کرنش ۲۵×۲۰۰mm و ۲۰۰×۲۰۰mm نسبت به زمان فرآیند نشان می‌دهد.



شکل ۹ تغییرات TG برای دو مسیر کرنش ۲۵×۲۰۰mm و ۲۰۰×۲۰۰mm

معیار مؤسسه تحقیقات کشش عمیق آمریکای شمالی (North American Deep Drawing Researc Group).

برای ساده‌سازی روش‌های تجربی و نظری ارایه شده برای تعیین منحنی FLD، NADDRG یک معادله نیمه تجربی ارایه کرد [21]. بر طبق این مدل، سمت چپ منحنی FLD با رسم خطی با زاویه ٤٥ درجه نسبت به افق از نقطه FLD_0 و سمت راست FLD با رسم خطی با زاویه ۲۰ درجه به دست می‌آید. FLD_0 نقطه‌ای است که روی محور عمودی (کرنش اصلی بزرگ‌تر) قرار دارد و نقطه حداقل FLD می‌باشد.

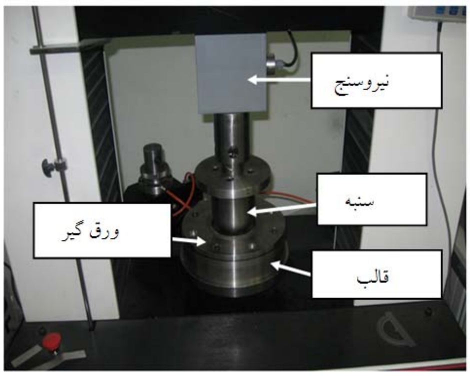
$$t \leq 2.54mm,\ FLD_0 = \frac{n}{0.21}(23.3 + 14.13t) \qquad (۷)$$

که t ضخامت ورق و n توان کارسختی ورق می‌باشد.

FLD نیمه نازک‌تر لوح ترکیبی IF با استفاده از مدل NADDRG و اطلاعات جدول (۲) محاسبه شد و سپس به عنوان معیار حد شکل‌دهی لوح ترکیبی وارد نرم افزار ABAQUS شد.

آزمایش‌های تجربی برای تعیین FLD

آزمون‌های FLD بر طبق روش استاندارد هکر [17] با استفاده از یک سنبه سر کروی به قطر ۱۰۱/٦ mm و یک پرس هیدرولیک ۲۰ تن انجام شد. موقعیت قرارگیری تجهیزات آزمون FLD که شامل سنبه، قالب و ورق گیر می‌باشد روی دستگاه پرس، در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

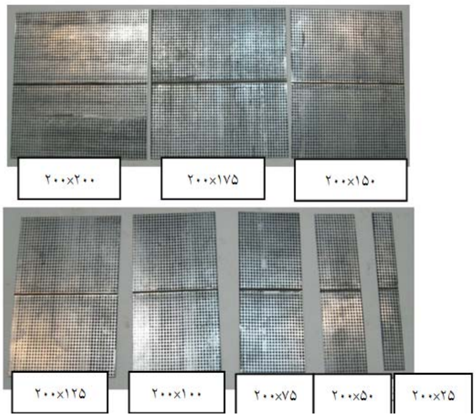


شکل ۱۰ تجهیزات آزمون FLD

یک ترمز کشش دایره‌ای به قطر ۱۳۲ mm روی قالب ایجاد شد تا از جریان مواد از لبه ورق به داخل قالب جلوگیری کند و اطمینان حاصل شود که فقط بخشی از ورق که در دهانه قالب قرار دارد توسط سنبه تغییر شکل داده است. تمام آزمون‌ها در حالت خشک (بدون وجود روانکار) و با سنبه‌ای به سرعت ۲۰ mm/min انجام شد. میزان نیروی ورق‌گیر بین

۱۰–۱/٦ تن بر اساس پهنای نمونه‌ها روی ورق گیر اعمال شد. یک ورق نازک به ضخامت mm ۰/٤ برای جبران اختلاف ضخامت لوح ترکیبی زیر نیمه نازک‌تر و در موقعیت ترمز کشش قرار گرفت تا سبب اعمال نیروی ورق‌گیر یک‌نواخت شود. پرس به سنسورهای نیروسنج و اندازه‌گیری جابه‌جایی مجهز بود و آزمون‌ها به محض این‌که نیرو یک‌باره کاهش پیدا می‌کرد متوقف می‌شد. کاهش یافتن یک‌باره نیرو در حین فرآیند، نشان دهنده پاره شدن ورق می‌باشد.

۸ نمونه به ابعاد ۲۵×۲۰۰mm تا ۲۰۰×۲۰۰mm از نمونه‌های جوش شده به‌گونه‌ای بریده شدند که خط جوش بر راستای کشش عمود باشد (نمونه‌های عرضی). نمونه‌ها با استفاده از دستگاه حک الکتروشیمیایی با دایره‌هایی به قطر mm ۲/۵ شبکه‌بندی شدند تا بتوان پس از تغییر شکل کرنش‌ها را اندازه‌گیری کرد. شکل (۱۱) نمونه‌های شبکه‌بندی شده برای آزمون FLD را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ سری نمونه‌های تجربی برای آزمون FLD

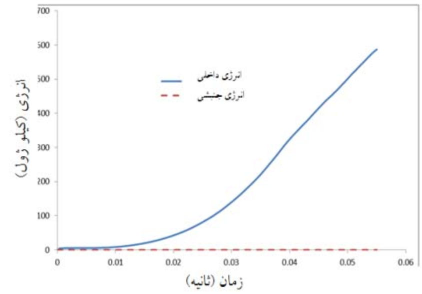
دایره‌هایی که در معرض تغییر شکل هستند پس از فرآیند به شکل بیضی در می‌آیند و بر حسب موقعیت در یکی از سه ناحیه ایمن، ناحیه گلویی و ناحیه شکست قرار می‌گیرند. کرنش‌های اصلی در صفحه ورق بر اساس کرنش‌های حقیقی بیان شد. کرنش‌های حقیقی کمینه و بیشینه با اندازه گیری قطر کوچک (b) و بزرگ (a) بیضی‌ها و مقایسه آن با قطر اولیه (d_0) با استفاده از روابط زیر اندازه‌گیری می‌شود.

$$\varepsilon_{major} = \ln(\frac{a}{d_0}), \varepsilon_{minor} = \ln(\frac{b}{d_0}) \qquad (۸)$$

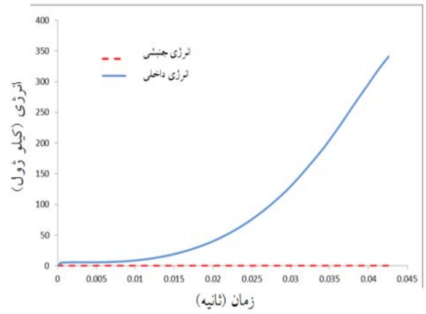
نتایج و بحث

بررسی شبه استاتیک بودن فرآیند شکل‌دهی در نرم‌افزار. افزایش سرعت شکل‌دهی برای کاهش زمان تحلیل‌ها در نرم افزار بسیار مفید است، اما این‌که تا چه اندازه می‌توان سرعت در فرآیند شکل‌دهی را افزایش داد و هنوز فرض کرد که فرآیند شبه استاتیک است جای بحث دارد. در نرم افزار ABAQUS دو شرط برای شبه استاتیک بودن یک فرآیند بیان شده است. در شرط اول بیان می‌کند که سرعت پانچ باید کمتر از ا درصد سرعت موج ورق فلزی باشد. این در حالی است که سرعت موج فولاد ۵۰۰۰m/s می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که سرعت پانچ از ۵۰m/s کمتر باشد که در شبیه‌سازی مورد بحث در این تحقیق سرعت پانچ برابر ۱m/s در نظر گرفته شده است.

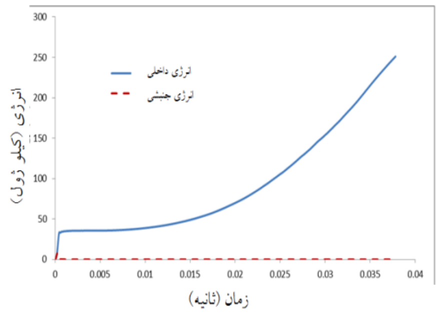
شرط دوم این که، انرژی جنبشی در طول فرآیند کمتر از پنج درصد انرژی داخلی فرآیند باشد. بر همین اساس انرژی جنبشی و داخلی را برای سه نمونه با پهناهای متفاوت ۲۰۰، ۱۵۰ و ۲۵ میلی متر مقایسه شد تا از شبه استاتیک بودن فرآیند اطمینان حاصل شود. شکل‌های (۱٤–۱۲) مقایسه انرژی جنبشی با انرژی داخلی برای این سه نمونه متفاوت نشان می‌دهد که سهم انرژی جنبشی ناچیز است و این نشان دهنده مناسب بودن سرعت در فرآیند شکل‌دهی و بنابراین شبه استاتیک بودن فرآیند می‌باشد.



شکل۱۲ تغییرات انرژی داخلی و جنبشی برای نمونه ۲۰۰×۲۰۰mm

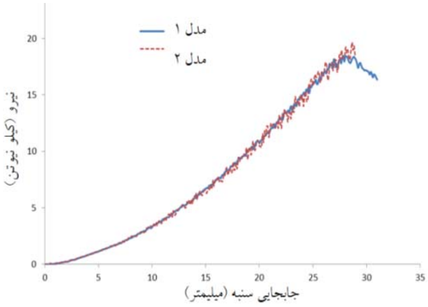


شکل ۱۳ تغییرات انرژی داخلی و جنبشی برای نمونه ۱۵۰×۲۰۰mm



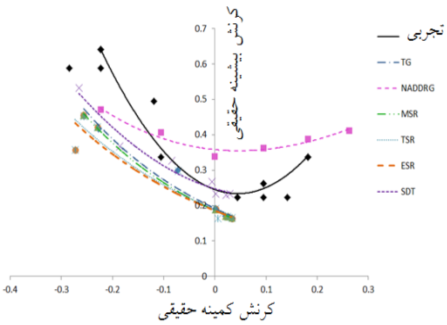
شکل ١٤ تغییرات انرژی داخلی و جنبشی برای نمونه ۲۵×۲۰۰mm

مقایسه تجربی و عددی FLDs. همان‌طور که قبلاً اشاره شد برای انتخاب مش‌بندی مناسب برای ورق، مش‌بندی تا آن جایی کوچک شد که نتایج با تغییر اندازه مش تغییر نکند. بر همین اساس دو مدل مش‌بندی برای ورقی با پهنای ۱۲۵ mmاستفاده شد. در مدل اول طول و عرض المان‌ها ۲ میلی‌متر و در مدل دوم ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مقایسه نمودار نیرو-جابه‌جایی پانچ برای این مدل در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلافی بین نتایج وجود ندارد. بنابراین از مدلی که ابعاد المان ورق ۲ mm است برای تمام شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.



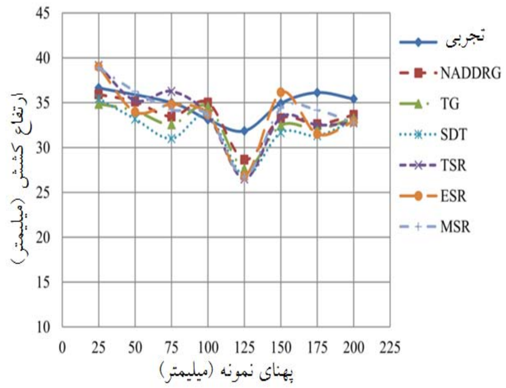
شکل ۱۵ مقایسه نیرو-جابه‌جایی پانچ برای دو مدل مش‌بندی متفاوت

برای بررسی حد شکل‌دهی لوح ترکیبی با استفاده از شش معیار عددی SDT، ESR، MSR، TSR، TG و NADDRG پیش‌بینی شد و با نتایج آزمایش‌های تجربی مقایسه شد. این نتایج در شکل (۱۵) نشان داده شده است. از شکل (١٦) مشخص است که FLD پیش‌بینی شده با استفاده از معیار SDT نسبت به سایر معیارهای عددی از نزدیکی بهتری با نتایج تجربی برخوردار است.



شکل ١٦ مقایسه FLD لوح ترکیبی IF پیش‌بینی شده با استفاده از معیارهای عددی

مقادیر حدی کرنش پیش‌بینی شده توسط معیارهای SDT، ESR، MSR، TSR و TG در منطقه کشش دو محوری (سمت راست منحنی FLD) به‌صورت خوشه‌ای بوده و در یک منطقه کوچکی نزدیک منطقه کرنش صفحه‌ای متمرکز شده‌اند. این امر نشان دهنده آن است که این معیارهای عددی توانایی پیش‌بینی سمت راست منحنی FLD را ندارند و فقط برای سمت چپ منحنی FLD مناسب هستند. نمودارهای حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده توسط معیارهای MSR, TSR و TG به یکدیگر نزدیک هستند و بین حدود شکل‌دهی پیش‌بینی شده توسط دو معیار ESR و SDT قرار دارند. نمودار حد شکل‌دهی ورق نازک‌تر بر اساس معیار NADDRG از دقت خوبی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی برخوردار نیست و نمودار حاصل از این معیار در بالای منحنی حد شکل‌دهی تجربی قرار دارد.



شکل ۱۷ تغییرات LDH بر اساس معیارهای مختلف

شکل (۱۷) نشان می‌دهد که نمونه‌های لوح ترکیبی دارای پهنای متفاوت دارای ارتفاع کشش متفاوتی هستند. (Limit Dome Height (LDH)) حداقل ارتفاع کشش برای آزمایش‌های تجربی و هم‌چنین معیارهای عددی در پهنای ۱۲۵ mm اتفاق می‌افتد. این شکل نشان می‌دهد که حداقل ارتفاع کشش در شرایط کرنش صفحه‌ای اتفاق می‌افتد. این نتیجه با نتایج هاسفورد [22] که حداقل ارتفاع کشش را در موقعیت کرنش صفحه‌ای پیشنهاد کرده بود، هماهنگی دارد.

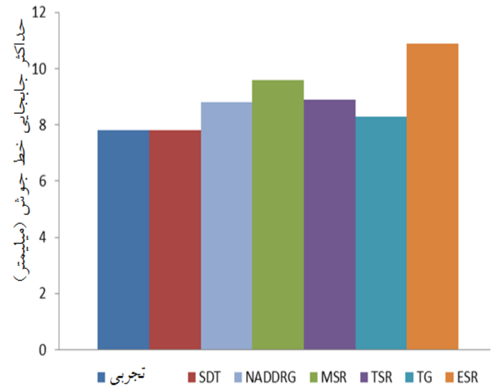
جابه‌جایی خط جوش یکی از مشکلاتی است که سبب محدود شدن شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی می‌شود. حداکثر جابه‌جایی خط جوش در شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی در رأس گنبد نمونه‌های حد شکل‌دهی اتفاق می‌افتد. پیش‌بینی میزان دقیق و هم‌چنین موقعیت آن با استفاده از معیارهای عددی از اهمیت خاصی برخوردار است. شکل‌های (۱۹ و ۱۸) بیشترین مقدار جابه‌جایی خط جوش را به ترتیب برای دو مسیر کرنش ۱۵۰×۲۰۰mm و ۲۰۰×۲۰۰mm نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودارها مشخص است معیار SDT نزدیک‌ترین پیش‌بینی را به مقدار تجربی دارد.

شکل (۲۰) مقایسه موقعیت شکست بین نمونه‌های تجربی و نمونه‌های شبیه‌سازی شده بر اساس معیار SDT را نشان می‌دهد. در این شکل فاصله بین خط جوش و موقعیت شکست با پارامتر X نشان داده شده است.

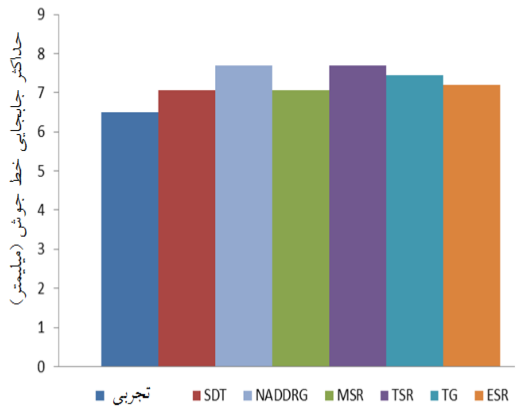
جدول (۳) مقایسه موقعیت شکست نمونه‌های تجربی و نمونه‌های FEM مربوط به معیار SDT را همراه با میزان خطای آنها نشان می‌دهد. از شکل (۲۰) و اطلاعات جدول (۳) مشخص است که معیار SDT از دقت خوبی در پیش‌بینی موقعیت شکست برخوردار است و نزدیکی خوبی با نتایج تجربی دارد.

جدول ۳ مقایسه نتایج تجربی و FE برای فاصله بین موقعیت شکست و خط جوش (X)

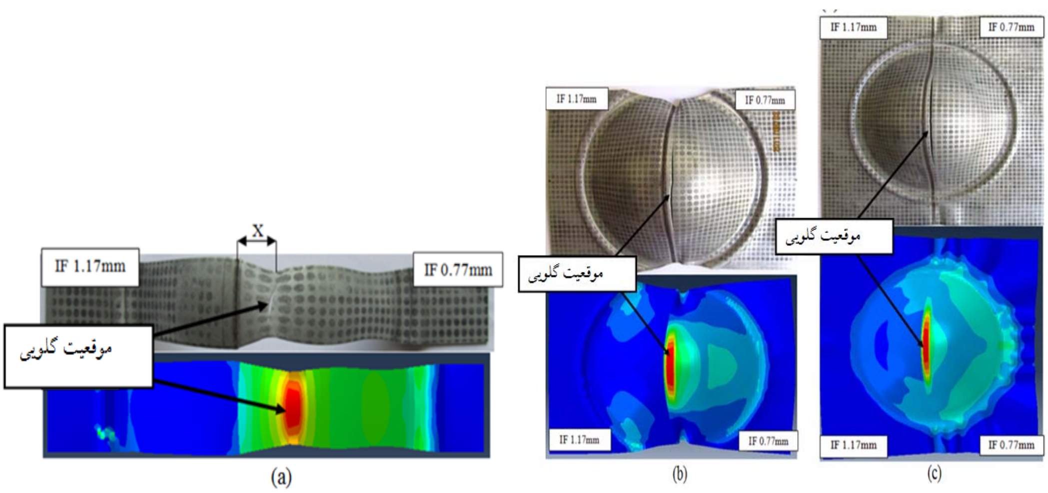
خطا	X(mm)-شبیه سازی	X(mm)-تجربی	مسیر کرنش
۰/۰۵	۱۶/۲	۱۵/۵	۲۰۰×۲۵mm
۰/۰۲	٤/۳۲	٤/٤	۲۰۰×۱۲۵mm
۰/۰۷	۳/۷٤	٤	۲۰۰×۲۰۰mm



شکل ۱۸ پیش‌بینی بیشترین مقدار جابه‌جایی خط جوش برای مسیر کرنش ۱۵۰×۲۰۰mm



شکل ۱۹ پیش‌بینی بیشترین مقدار جابه‌جایی خط جوش برای مسیر کرنش ۲۰۰×۲۰۰mm



شکل ۲۰ مقایسه موقعیت شکست نمونه‌های تجربی و FE بر اساس معیار SDT (a) برای مسیر کرنش ۲۵×۲۰۰mm (b) برای مسیر کرنش ۱۲۵ ×۲۰۰mm (c) برای مسیر کرنش ۲۰۰×۲۰۰mm

نتیجه‌گیری

در آزمون استاندارد کشش تک محوری (ASTM-E8) روی نمونه عرضی لوح ترکیبی و هم‌چنین آزمون استاندارد سنبه سر کروی، مشاهده شد که شکست در نیمه نازک‌تر ورق و دور از خط جوش اتفاق می‌افتد و این نشانگر سالم بودن خط جوش و انتخاب صحیح پارامترهای جوش می‌باشد. این نتیجه با در نظر گرفتن ریزساختار مقطع جوش که نشان دهنده نفوذ کامل و کیفیت مناسب جوش می‌باشد نیز تأیید می‌شود.

بین مدل‌های عددی ESR، MSR، TSR، SDT، TG و معیار نیمه تجربی NADDRG که برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی و ارتفاع کشش لوح‌های ترکیبی استفاده شد، معیار عددی SDT بهترین دقت را برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی لوح ترکیبی دارد. FLD و ارتفاع کشش پیش‌بینی شده با استفاده از معیار عددی SDT نسبت به سایر معیارهای عددی دارای بیشترین هماهنگی با نتایج تجربی می‌باشد و معیار ESR کمترین نزدیکی را دارد.

کرنش‌های حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های عددی در منطقه کرنش صفحه‌ای به‌صورت خوشه‌ای و کنار هم قرار دارند، بنابراین منحنی حد شکل‌دهی در نیمه سمت راست FLD گسترده نشده است. بر این اساس معیارهای عددی بیان شده توانایی پیش‌بینی حد شکل‌دهی برای نیمه سمت راست FLD را ندارند.

بیشترین جابه‌جایی خط جوش در رأس گنبد اتفاق می‌افتد و معیار SDT نزدیک‌ترین پیش‌بینی را از نظر مقدار آن با نمونه‌های تجربی دارد.

پارگی لوح‌های ترکیبی دارای پهنای متفاوت در ارتفاع‌های کشش متفاوتی اتفاق می‌افتد. نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که حداقل ارتفاع کشش در شرایط کرنش صفحه‌ای اتفاق می‌افتد که این موضوع با نتیجه‌گیری هاسفورد هماهنگی دارد.

مقایسه موقعیت شکست حاصل از نتایج تجربی و معیار عددی SDT نشانگر هماهنگی خوب معیار عددی SDT با نتایج تجربی است.

مراجع

1. Sheng, Z.Q., "Formability of tailor-welded strips and progressive forming test", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 205, pp. 81–88, (2008).
2. Keeler, S.P. and Backofen, W.A., "Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches", *Transactions of the ASM*, Vol. 56, (1963).
3. Goodwin, G.M., "Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop", *SAE Paper*, No. 680093, (1968).
4. Hecker, S.S., "A simple forming limit curve technique and results on aluminum alloys, sheet metal forming and formability", *Proceedings of the 7th Biennial Congress of the International Deep Drawing Research Group*, Amsterdam, 5.1–5.8, (1972).
5. Swift, H.W., "Plastic instability under plane stress", *Journal of Mechanics and Physics Solids*, Vol. 1, pp. 1–18, (1952).

6. Hill, R., "On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets", *Journal of Mechanics and Physics Solids*, Vol. 1, pp. 19–30, (1952).
7. Marciniak, Z. and Kuczynski, K., "Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal", *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 9, pp. 609–620, (1967).
8. Narasimhan, K. and Wagoner, R.H., "Finite element modeling simulation of in-plane forming limit diagrams of sheets containing finite defects", *Metall Trans*, Vol. 22A, pp. 2655–2665, (1991).
9. Brun, R., Chambard, A., Lai, M. and de Luca, P., "Actual and virtual testing techniques for a numerical definition of materials", *Proc NUMISHEET'99*, Besançon France, pp. 393- 398, (1999).
10. Pepelnjak, T., Petek, A. and Kuzman, K., "Analysis of the forming limit diagram in digital environment", *Sheet Metal Erlangen*, Germany, 5-8 April, pp. 697-704, (2005).
11. Shi, M.F., Pickett, K.M and Bhatt, K.K, "Formability issues in the application of tailor welded blank sheet", Proceedings of the Sheet Metal and Stamping Symposium, Detroit, Michigan, U.S.A., pp. 27–35, (1993).
12. Shi, M.F., Eisenmenger, M. and Bhatt, K.K., "Influence of laser welding parameters on formability and robustness of blank manufacturing: an application to a body side frame", *SAE technical paper*, No. 950922, (1995).
13. Chien, W.Y., Pan, J. and Friedman, P.A., "Failure Prediction of Aluminum Laser-Welded Blanks", International Journal of Damage Mechanic, Vol. 12, pp. 193–223, (2003).
14. Chien, W.Y., Pan, J. and Tang, S.C, "A Combined Necking and Shear Localization Analysis for Aluminum Alloys Sheets Under Biaxial Stretching Conditions", *International Journal of Plasticity*, Vol. 20, pp. 1953–1981, (2004).
15. Chan, L.C., Chan, S.M., Cheng, C.H. and Lee, T.C., "Formability and weld zone analysis of tailor-welded blanks for various thickness ratios", *Journal of Engineering Material Technology Trans ASME*, Vol. 127, pp. 179–85, (2005).
16. Metals Test Methods and Analytical Procedures, Annual Book of ASTM Standards, ASTM-E8, West Conshohocken, PA Volume 03.01, (2000).
17. Hecker, S.S., "A cup test for assessing stretchability", *Met Eng Q*, Vol. 14, pp. 30–36, (1974).
18. Safdarian, R., Moslemi Naeini, H. and Liaghat, G.H., "Investigation of Weld Line Movement in Tailor Welded Blank Forming", proceeding of *14th International Conference in Advanced Materials and Processing Technologies AMPT2011*, Istanbul, Turkey, (2011).
19. Hill, R., "A Theory of Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals", *Proc. Roy. Soc. Lond.*, 193A, pp. 197–281, (1948).

20. Kumar, S., Date, P.P. and Narasimhan, K., "A new criterion to predict necking failure under biaxial stretching", *Journal of Material Processing Technolgy*, Vol. 45, pp. 583-588, (1994).

21. Levy, S.B., "A comparison of empirical forming limit curves for low carbon steel with theoretical forming limit curves of Ramaekers and Bongaerts", IDDRG WG3, Ungarn, (1996).

22. Hosford, W.F. and Caddel, R.M., "*Metal forming –mechanics and metallurgy*", Second Edition, Prentice Hal, (1993).